

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ, ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

**Старцев А.А.**

*Руководитель - д.т.н. Литвиненко В.В.*

Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, г.

Харьков, Украина

startsev-olexandr@rambler.ru

Создание функциональных материалов является одной из важнейших проблем современности. Они должны удовлетворять заданным требованиям, часто иметь экстремальные, не характерны уже известным материалам физико-химические, технические свойства. Современное разнообразие методов обработки ограничено технологической эффективностью и стабильностью исходных свойств. Возможным путем предоставления определенных свойств материалу может быть использование концентрированных потоков энергии при его обработке. Распространенного использования получили электронные [1,2], ионные и лазерные пучки, действие каждого из них на материалы существенно отличаются от влияния другого, несмотря на различную природу фактора.

В данной работе посвящено внимание именно исследованию структурно-фазовых превращений в металлах на примере промышленного титанового сплава ВТ1-0 и вольфрама, индуцированных облучением сильноточным релятивистским электронным пучком. Исследованы те преобразования, которые возникают при превышении характерного порога мощности пучка, который определяет переход от процесса десорбции поверхности до абляционного режима. Проблема описания взаимодействия с образцом заключается в ее большом деструктивном характере. Следует учитывать особенности пространственного и временного распределения заряда пучка, объемного тепловыделения, фазовых превращений материала, термомеханические напряжения, влияние газовой-капельного облака на поверхность и т.п. Соответственно, формулировка корректной динамической задачи и ее решение является осложненными. Глубокое понимание процессов, происходящих в абляционном режиме, позволяет использовать приобретенные знания в области создания новых функциональных материалов.

В данной работе построена упрощенная макроскопическая модель [3], верификация входных данных для которой осуществлялась с использованием анализов результатов проведенного эксперимента по облучению трубчатым и сплошным электронными пучками (энергия электронов  $\sim 0.5$  МэВ, длительность 5 мкс, сила тока 2 кА) соответственно металлических мишеней титанового сплава ВТ1-0 и вольфрама. Зная

основные характерные параметры электронного пучка, материала, среды облучения, разработана модель, которая основывается на рассмотрении взаимосвязанных радиационных, тепловых и упругих механических полей. Она является универсальной в промежутке энергий от 20 кэВ до 3 МэВ, и практически реализуется для большинства массивных мишеней из металлов и однородных сплавов. Экспериментальные исследования с помощью методов металлографии и фрактографии обнаружили, что облучение привело к значительному разрушению титанового образца, образование кратера глубиной 0.5 мм и образование многослойной приповерхностной структуры (см. Рис.1) с новыми физико-механическими свойствами, что объясняется течением комплекса абляционных процессов. Вольфрамовый образец также испытал значительные разрушения, при этом, ярко заметна приповерхностная спалляция мишени, что объясняется особенностями релаксации напряжений. Толщина образовавшегося скола  $\sim 0.2 - 0.3$  мм, образовалась гомогенная капельная фазы в облученной области.

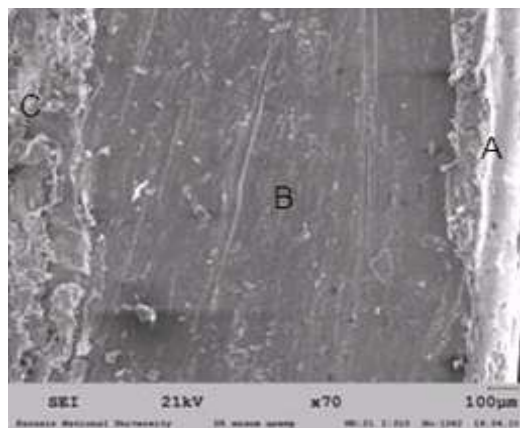


Рис.1 Фрактограмма поперечного взлома области в центре кратера облученного образца: А- зона переплава, В- переходная, С- необлученная.

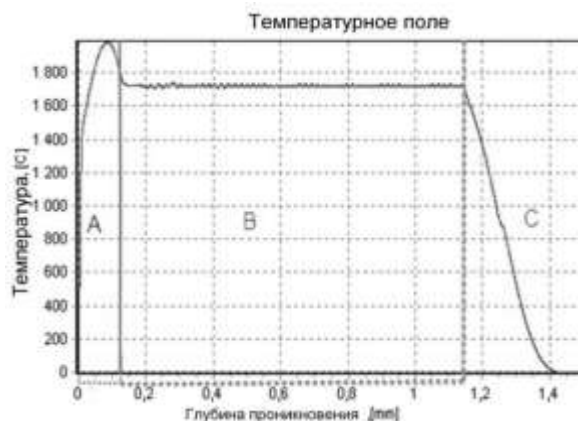


Рис.2 Температурное поле титановой мишени при плотности тока пучка  $j = 4 \text{ MA/m}^2$ .

Модель электронно-пучковой абляции металлической мишени основывается на слабо связанной теории термоупругости с отделением задач нахождения температурного и термомеханических полей. Математическая модель эволюции температурного поля построена по модели теплопроводности с учетом релаксации теплового потока и градиента температуры. Модель учитывает: скрытые теплоты твердотельных фазовых превращений мишени, плавления и кипения, пространственную и временную неоднородность распределения плотности тока пучка, зависимость термодинамических коэффициентов от температуры, зависимость движения абляционных интерфейсов от особенностей тепловыделения, термомеханических напряжений.

Поставленная проблема упрощена до многофазной задачи Стефана [4] для полубесконечного пространства, решена модифицированным методом сглаживания коэффициентов. Проведен анализ для различных граничных условий, найдена связь между ходом нагрева и охлаждения и выходным приповерхностным строением облученного материала. Учтено конденсацию продуктов абляции.

Подтверждено, тепловой удар, обусловленный скоростным нагревом, вызвал фазовый взрыв в титановом сплаве. Ценностью решения динамической задачи является то, что она дала возможность оценить реальную глубину проплавления для титанового сплава, толщины образовавшихся зон, границу между модифицированным и не модифицированным объемом (см. Рис.2), что хорошо согласуется с результатами анализа фрактограмм. Для эволюции абляционного интерфейса замечено характерную импульсивность, что вызвано особенностями объемного тепловыделения и локализации напряжений. Скорость движения интерфейса между модифицированной и неизменной зонами переходит в стационарный режим. Но, относительно к вольфраму, результаты моделирования более отличаются от экспериментальных, что, возможно, объясняется слоистостью структуры металла и существенной связью между полями температур и механических напряжений.

Создание устройств с гибкими параметрами регулирования действия облучения позволят направленно изменять поверхностно-объемные свойства материалов и изделий из них, при этом целесообразно использование построенной модели электронно-пучковой абляции для оптимизации процесса обработки.

#### Литература

1. В.В. Белозеров, С.Е. Донец, В.Ф. Клепиков и др. Физико-механические свойства сталей 12Х21Н5Т и 08Ч18Н10Т, облученных сильноточным трубчатым релятивистским электронным пучком в режиме абляции. Физическая инженерия поверхности. №2, т.9, 2011, с.170-175.
2. R.H. Ritchie, O.H. Crawford. Intense e-Beam interaction with matter. Oak Ridge National laboratory, 1984, report CONF-8409264—1.
3. V.V. Lytvynenko, A.G. Ponimarev, O.A. Startsev, V.T. Uvarov. Simulation of thermal effects of high-current relativistic electron beam on the titanium alloy vt1-0. «Journal of Kharkiv University», «Nuclei, Particles, Fields», №1001, 2012, issue 2 /54/, p.104-109.
4. П.Н. Вабищевич. Численные методы решения задач со свободной границей. Москва, 1987, изд-во Моск. ун-та, 164 с.